

УДК 539.3

DOI: 10.20535/2521-1943.2019.86.176173

# Оцінювання граничного стану вуглепластику AS4/3501-6 carbon/epoxy зі схемою армування $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$ в умовах плоского та лінійного напруженого стану

В. В. Рубашевський • С. М. Шукаєв

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 16 July 2019 / Accepted: 17 September 2019

**Проблематика.** Композиційні матеріали, зокрема, шаруваті вуглепластики, армовані високоміцними односпрямованими волокнами, широко застосовуються в багатьох галузях промисловості. Активний розвиток виготовлення волокон та матриць приводить до великої кількості нових матеріалів і широкого їх застосування у виробництві потребує ефективних методик для оцінювання граничного стану вуглепластика за різних умов навантаження.

**Мета дослідження.** Порівняльний аналіз методів оцінювання міцності на прикладі шаруватого вуглепластику з волокном AS4 carbon і матрицею 3501-6-epoxy зі схемою армування  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  в умовах лінійного та плоского напруженого стану за допомогою аналітичної моделі деградації механічних властивостей шару композиту, запропонованої в роботі М.К. Кучера і М.М. Заразовського і методом чисельного моделювання у програмному середовищі ANSYS Workbench.

**Методика реалізації.** Механічні характеристики моношару вуглепластику були попередньо розраховані за різними аналітичними методами: правилом суміші, методом коаксіальних циліндрів, моделлю Кільчинського і методом Ваніна. Розрахунки напружень за двома методами порівнювались з результатами випробувань трубчастих зразків з шаруватого вуглепластику з волокном AS4 carbon і матрицею 3501-6-epoxy в умовах лінійного та плоского напруженого стану, опублікованими в роботі групи авторів (P. D. Soden, M. J. Hinton & A. S. Kaddour).

**Результати дослідження.** Проаналізовано межі застосування чисельного та аналітичного методів для оцінювання міцності вуглепластиків за умови лінійного та плоского напруженого стану.

**Висновки.** На основі досліджень зроблено висновок про те, що модель деградації механічних властивостей шару потребує удосконалення в умовах від'ємного співвідношення між головними напруженнями. Підтверджено ефективність застосування модулів ACP(Pre) і ACP(Post) програмного середовища ANSYS Workbench для оцінки граничного стану шаруватого вуглепластику в умовах лінійного та плоского напруженого стану.

**Ключові слова:** оцінка граничного стану, плоский напружений стан, шаруватий вуглепластик, композиційні матеріали, константи пружності.

## Вступ

Композиційні матеріали, зокрема, шаруваті вуглепластики, армовані високоміцними односпрямованими волокнами, широко застосовуються в багатьох галузях промисловості. Активний розвиток виготовлення волокон та матриць приводить до великої кількості нових матеріалів і широкого їх застосування у виробництві потребує ефективних методик для оцінювання граничного стану вуглепластика за різних умов навантаження. На сьогодні активно розвиваються як чисельні, так і аналітичні підходи до оцінки граничного стану композиційних матеріалів. Одним з найефективніших методів є пошарова перевірка міцності пакету, що дозволяє визначити характер руйнування, тобто виявити шар з якого починається руйнування, а також за яких напружень це відбувається. Застосування критерію міцності для пакету при наявності експериментальних значень границь міцності є єдиним надійним і достовірним способом оцінки його міцності, але залишається відкритим питання їх ефективності та меж застосування.

Актуальність питання оцінювання граничного стану шаруватих вуглепластиків за різних умов навантаження зумовила появу значної кількості як українських, так і іноземних наукових праць у цій царині. Для вирішення поставленої дослідницької проблеми в роботі автори спираються на наукові доробки Л.П. Хорошуна (обґрунтування методів розрахунку фізико-механічних сталих композиційних матеріалів) [5], науковців Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України М.К. Кучера і М.М. Заразовського (обґрунтування моделі деградації механічних характеристик в процесі деформування) [1, 2], групи дослідників P.D. Soden, M.J. Hinton та A.S. Kaddour (експериментальні дослідження трубчастих зразків з ортотропного

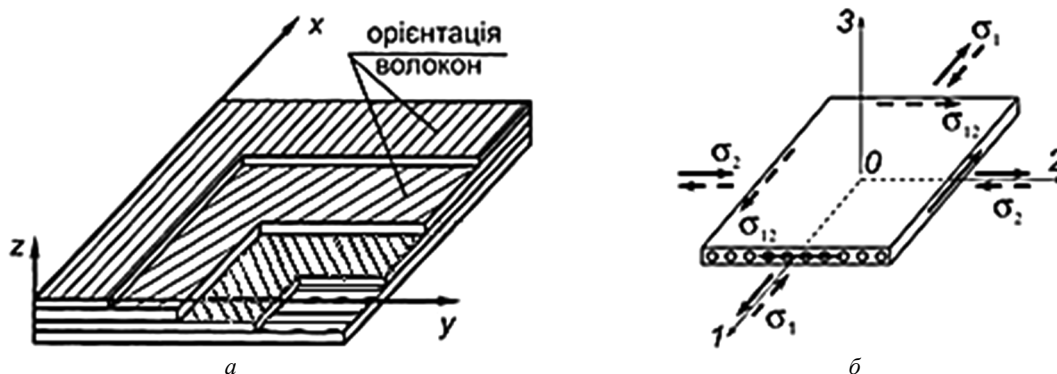
шаруватого вуглепластику з волокном AS4 carbon і матрицею 3501-6-ерохи зі схемою армування  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  в умовах лінійного і плоского напруженого стану) [3, 6], групи дослідників Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського (аналіз методів оцінювання модулів пружності шару композиційного матеріалу, обґрунтування створення скінчено-елементної моделі тіл “склеюванням” неузгоджених скінчено-елементних сіток, застосування методів розрахунку на міцність до реальних конструкцій з композиційних матеріалів) [8 – 10], науковців Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” Я.С. Карпова, В.Г. Ставиченко (здійснення комплексного аналітичного огляду вітчизняного та зарубіжного досвіду, розроблення загальної методики прогнозування характеристик міцності шаруватих композиційних матеріалів з урахуванням температурного впливу) [11] та інших вчених, роботи яких присвячені розробці методів оцінювання міцності шаруватих композиційних матеріалів.

**Метою** роботи є порівняльний аналіз методів оцінювання міцності шаруватого вуглепластику в умовах плоского та лінійного напруженого стану за допомогою аналітичної моделі деградації механічних властивостей шару композиту, запропонованої в роботі [1] і чисельного моделювання у програмному забезпеченні ANSYS Workbench. Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними результатами, отриманими на трубчастих зразках з ортотропного шаруватого вуглепластику з волокном AS4 carbon і матрицею 3501-6-ерохи зі схемою армування  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  в умовах плоского і лінійного напруженого стану із різними співвідношеннями між  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  взяті з роботи [3].

Основні положення аналітичної моделі базуються на критерії найбільших напружень ортотропного тіла, що перебуває в умовах плоского напруженого стану. Припускається, що руйнування починається у випадку, коли напруження в одному з шарів досягають критичного значення, за яких не виконується хоча б одна з нижче наведених умов

$$\tilde{\sigma}_{-1} < \sigma_1 < \tilde{\sigma}_{+1}; \tilde{\sigma}_{-2} < \sigma_2 < \tilde{\sigma}_{+2}; -\tilde{\sigma}_{12} < \sigma_{12} < \tilde{\sigma}_{12}, \quad (1)$$

де  $\tilde{\sigma}_{12}$  – границя міцності на зсув шару в площині армування,  $\tilde{\sigma}_{-1}$  і  $\tilde{\sigma}_{+1}$  – границі міцності на стискання і розтягання за напрямом армування, відповідно,  $\tilde{\sigma}_{-2}$  і  $\tilde{\sigma}_{+2}$  – границі міцності на стискання і розтягання у трансверсальному напрямі. Вважається, що шаруватий композит втрачає несівну здатність у випадку руйнування всіх шарів. Описуючи процеси деформування і руйнування пакету шарів використовують дві системи координат: глобальну  $x y z$  (рис. 1.а) для цілого пакету шарів і локальну 123 (рис. 1.б) для кожного окремого шару. Осі цих систем обираються таким чином, щоб вони співпадали з осями ортотропії композиту.



**Рис. 1.** Геометрія шаруватого композиту (а) і окремого шару(б), що перебуває в умовах плоского напруженого стану та відповідні осі ортотропії [2]

Згідно з роботою [2] у розрахунковій моделі зроблені наступні припущення:

1. Всі шари композиційного матеріалу є лінійно пружними аж до остаточного його руйнування.
2. При деформуванні композита має місце жорстке з'єднання між сусідніми шарами.
3. В процесі руйнування окремих шарів зв'язок між шарами не порушується.
4. Має місце однорідність поля деформацій за товщиною композита та однорідність компонент тензора локальних напружень в кожному шарі.
5. Якщо в процесі деформування шару одна з компонент тензора напруження досягла відповідної границі міцності, то в цьому напрямі шар перестає чинити опір деформуванню.

Розрахунки виконуються в декілька етапів.

**Визначення характеристик пружності моношару композиту.** Для розрахунків напруженого стану композиту необхідно знати ефективні пружні константи окремого шару вуглепластику. Ці характеристики було

розраховано в роботі [4] за допомогою аналітичних методів [2, 8], такими як правило суміші, метод коаксіальних циліндрів, модель Кільчинського і метод Ваніна, і порівнювались з експериментальними даними [3].

Загалом за всіма показниками найкращу кореляцію між розрахунковими даними і результатами експериментів отримано з використанням методу коаксіальних циліндрів. На противагу іншим методам, що розглядаються, Метод Ваніна і модель Кільчинського дозволяють визначити модуль зсуву  $G_{23}$ . В зв'язку з тим, що модель Кільчинського і правило суміші дали незадовільні результати у подальших розрахунках їх не використовували.

У таблиці 1 представлені значення границь міцності вуглепластику AS4/3501-6 carbon/epoxy, які взяті з роботи [3].

Таблиця 1

**Границі міцності армованого шару вуглепластику AS4/3501-6 carbon/epoxy [3]**

$\sigma_{+1}$ (МПа)	$\sigma_{-1}$ (МПа)	$\sigma_{+2}$ (МПа)	$\sigma_{-2}$ (МПа)	$\sigma_{12}$ (МПа)
1950	1480	48	200	79

**Визначення ефективних характеристик пружності пакету шарів вуглепластику.** Для визначення ефективних характеристик пружності всього шаруватого пакету використовувався підхід Л.П. Хорошуна [5]. Згідно з яким компоненти тензора ефективної жорсткості шару, які виражаються через відповідні пружні константи  $E_1, E_2, G_{12}, G_{23}, \nu_{12}$  були усереднені за об'ємом для обраної композиції шарів. В результаті переходу від тензора ефективної жорсткості до матриці ефективної жорсткості отримують ефективні константи пружності матеріалу [1, 5].

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

де  $[A] = [\lambda]^{-1}$  – тензор ефективної піддатливості [1,5].

Для прикладу представлено розрахунок значення ефективного модуля пружності  $E_x$  для даного композиту, за експериментальними значеннями шару вуглепластику:  $E_1 = 126$  ГПа,  $E_2 = E_3 = 11$  ГПа,  $G_{12} = G_{23} = G_{13} = 6,6$  ГПа,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13} = 0,28$ .

$$\langle \lambda_{ij} \rangle = [2\lambda_{ij}^{90} + 2\lambda_{ij}^{-45} + 2\lambda_{ij}^{45} + 2\lambda_{ij}^0] \cdot \Delta h / H \quad (3)$$

$$\lambda_{11}^0 = m^4 \lambda_{11} + 2m^2 n^2 (\lambda_{12} + 2\lambda_{66}) + 4mn(m^2 \lambda_{16} + n^2 \lambda_{26}) + n^4 \lambda_{22} \quad (4)$$

де  $\Delta h, H$  – товщини моношару і композиту, відповідно,  $\lambda_{ij}^0$  – параметри жорсткості шарів ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ), які повернені на кут  $\theta$  відносно локальної системи координат,  $\langle \lambda_{ij} \rangle$  – компоненти матриці осереднених жорсткостей,  $n = \sin(\theta)$ ,  $m = \cos(\theta)$ ,  $\Delta h = 0,125$  мм,  $H = 1$  мм.

$$\lambda_{ij} = \begin{bmatrix} 126 & 4,36 & 4,36 & 0 & 0 & 0 \\ 4,36 & 11 & 3,49 & 0 & 0 & 0 \\ 4,36 & 3,49 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6,6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6,6 \end{bmatrix}$$

$$E_x = [2 \cdot 126 + 2 \cdot 45,68 + 2 \cdot 45,68 + 2 \cdot 11] \cdot 0,125 = 57,09 \text{ ГПа.}$$

Аналогічно визначаються інші пружні характеристики за методами, наведеними в роботі [4]. Результати розрахунків характеристик композиту AS4/3501-6 carbon/epoxy зведені у таблиці 2.

З таблиці 2 видно, що різниця між результатами отриманими за експериментальними і розрахунковими даними моношару вуглепластику знаходиться в межах 2,1...9,8% для модулів Юнга, модулів зсуву – 1,1...31,2%, коефіцієнтів Пуассона – 1,7...31,5%.

Таблиця 2

**Розрахункові значення ефективних пружних констант вуглепластику AS4/3501-6 carbon/epoxy із схемою армування  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$**

Пружна константа	Ефективні пружні константи отримані за експериментальними і розрахунковими даними моношару вуглепластику		
	1.Експериментальні дані	2.Метод коаксіальних циліндрів	3.Метод Ваніна
$E_x$ , (ГПа)	57,09	61,49	58,40
$E_y$ , (ГПа)	57,09	61,49	58,40
$E_z$ , (ГПа)	10,10	9,88	9,87
$G_{xy}$ , (ГПа)	19,76	21,55	19,98
$G_{yz}$ , (ГПа)	6,60	7,18	4,54
$G_{xz}$ , (ГПа)	6,60	7,18	4,54
$\nu_{xy}$	0,288	0,283	0,306
$\nu_{yz}$	0,276	0,264	0,189
$\nu_{xz}$	0,276	0,264	0,189

**Визначення осереднених за товщиною композиту напружень.** Напруження що виникають у КМ описуються наступними співвідношеннями [5]

$$\langle \sigma_i \rangle = \lambda_{ij} \cdot \langle \varepsilon_j \rangle, \langle \varepsilon_i \rangle = A_{ij} \cdot \langle \sigma_j \rangle, (i, j = 1, 2, \dots, 6), \quad (5)$$

де  $\lambda_{ij}$ ,  $A_{ij}$  – компоненти ефективних характеристик жорсткості і піддатливості ортотропного композиту.

У таблиці 3 розміщені розрахункові значення граничних напружень руйнування на основі отриманих ефективних пружних констант у порівнянні з результатами випробовувань [6], для даного вуглепластику в умовах лінійного і плоского напруженого стану, де  $c$  – відношення між більшим і меншим напруженням.

Таблиця 3

**Порівняння розрахункових і експериментальних значень граничних напружень**

№	Результати випробувань [6]		Результати розрахунків								c
			За експер. значеннями шару		За методом коаксiальних цилiндрiв		За методом Ванiна		Чисельне моделювання		
	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	
1	-28,8	644,8	-28,7	642,1	-28,75	642,7	-28,6	641,9	-29	649,3	-22,39
2	-213,5	387,1	-309,5	561,1	-309,6	561,3	-307,9	558,2	-232,7	421,8	-1,813
3	-248,4	399,3	-330,8	531,8	-342,3	550,3	-340,4	547,3	-270	434,1	-1,608
4	-300,7	405,4	-394,8	532,2	-395	532,5	-392,9	529,6	-324	436,7	-1,348
5	-232,9	514,4	-261,5	577,4	-261,6	577,6	-260,1	574,4	-260,1	574,3	-2,208
6	-87,2	777,3	-70,6	629,1	-70,7	629,7	-70,6	628,7	-77,4	689,6	-8,91
7	721,9	38,7	662	35,4	662,7	36,55	662,2	35,5	683,6	36,6	18,654
8	406,2	812,4	385,3	770,6	385,8	771,6	386,5	773,0	386,5	773	2
9	677,6	18,1	656,4	17,5	657,1	17,55	656,6	17,5	656,6	17,5	37,436
10	677,1	220,0	723,9	235,2	724,9	235,6	725,4	235,7	725,4	235,6	3,078

№	Результати випробувань [6]		Результати розрахунків								с
			За експер. значеннями шару		За методом коаксіальних циліндрів		За методом Ваніна		Чисельне моделювання		
	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	
11	730,5	202,0	712,1	196,9	712,9	197,2	713,3	197,3	713,3	197,2	3,616
12	54,5	723,0	50,2	666,5	50,4	667,3	50,3	666,8	57,2	758,8	13,266
13	450,0	849,0	412,8	779,0	413,4	780,2	414,3	781,1	414,3	781,7	1,887
14	172,2	790,0	152,2	698,2	152,4	699,0	152,4	699,0	151,7	696	4,588
15	35,8	718,0	33,0	661,2	33,0	661,9	33,0	661,4	40,4	810,3	20,056
16	124,8	696,0	123,6	689,3	123,7	690,1	123,7	690,0	133,7	745,64	5,577
17	254,0	774,0	237,9	724,8	238,2	725,7	238,3	726,2	241,3	733,5	3,04
18	0	658,0	0	651,3	0	651,6	0	650,9	0	663	–
19	–537,0	0	–505,5	0	–505,4	0	–502,5	0	–545	0	–

**Визначення граничних напружень за допомогою чисельного моделювання.** В програмному середовищі ANSYS Workbench, використовуючи методику описану в роботі [7], було змодельовано трубчасті зразки різних довжин та діаметрів у відповідності до роботи [6]. Використовуючи модуль ACP(Pre) змодельовано укладку з 8 шарів товщиною 0,125 мм під кутами  $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ]$ . За критерієм найбільших напружень, використовуючи модуль ACP(Post) були отримані значення граничних напружень, які зведені у таблиці 3.

**Аналіз результатів.** Отримані результати розрахунків свідчать, що величина похибки при оцінюванні граничного стану шаруватого вуглепластику в умовах плоского та лінійного напруженого стану як за моделлю деградації шарів, так і за чисельним розрахунком залежить від параметрів виду напруженого стану. У випадку лінійного напруженого стану похибка становила 1,1%...6,4% за аналітичного методу і 0,8%...1,5% за чисельного методу. За умови плоского напруженого стану для додатних значень співвідношення напружень с похибки становлять: 0,9%...11,6% за аналітичного методу і 2,4%...12,9% за чисельного методу, тобто, практично збігаються. Якщо співвідношення с має від'ємний знак, то похибка за чисельним методом лежить в тих же межах: 0,7%...11,7%, а за аналітичним методом значно зростає: 0,2%...45,0%.

### Висновки

Виконано порівняльний аналіз методів оцінювання граничного стану шаруватого вуглепластику в умовах лінійного та плоского напруженого стану за допомогою аналітичної моделі деградації механічних властивостей шару композиту, запропонованої в роботі [1] і чисельного моделювання у програмному середовищі ANSYS Workbench.

Показано, що модель деградації механічних властивостей шару композиту дає задовільні результати за умови плоского напруженого стану з додатнім відношенням між більшим і меншим напруженнями. Точність аналітичного методу (максимальна похибка не перевищує 12%) мало відрізняється від точності чисельного розрахунку, який ґрунтується на алгоритмі пошарового розрахунку пружних характеристик. Слід зазначити, що для застосування моделі потрібно знати лише механічні характеристики складників моношару (волокно і матриця), в той час, як чисельний розрахунок потребує значення механічних характеристик моношару в цілому.

Виявлено, що застосування моделі деградації механічних властивостей шару композиту до оцінювання граничного стану в умовах плоского напруженого стану з від'ємним відношенням між більшим і меншим напруженнями може приводити до значної похибки (максимальна похибка досягала 45%). Отже, модель потребує удосконалення для використання за таких умов.

Підтверджено ефективність застосування модулів ACP(Pre) і ACP(Post) програмного середовища ANSYS Workbench для оцінки граничного стану шаруватого вуглепластику за всіх режимів навантажування в умовах лінійного та плоского напруженого стану (максимальна похибка не перевищує 13%).

### References

1. Кучер М.К., Заразовський М.М. Оцінка міцності шаруватих пластиків із врахуванням деградації механічних характеристик в процесі деформування // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. – 2009. – №57. – С. 174 – 179.
2. Заразовський М. М. Деформування і міцність шаруватих вуглепластиків при кімнатній і криогенних температурах: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Заразовський Максим Миколайович – Київ, 2009. – 145 с.

3. Soden P.D., Hinton M. J. & Kaddour. A.S. Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fiber-reinforced composite laminates. Composites Science and Technology– 1998. – vol. 58. no. 7. – P. 1011 – 1022. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00078-5)
4. Рубашевський В.В., Заразовський М.М., Шукаєв С.М. Аналіз методів визначення констант пружності однонаправленого шару композиційних матеріалів // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – Том 80. №2. – С. 107 – 112. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109634>
5. Хорошун Л.П. Статистическая механика и эффективные свойства материалов // Механика композитов // Под ред. А.Н. Гузя. – К: Наук. думка, 1993. – Том. 3. – 390 с.
6. Soden P.D., Hinton M.J. & Kaddour A.S. Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates: failure exercise benchmark data. Composites Science and Technology. – 62. – 2002. – P. 1489 – 1514.
7. [https://www.academia.edu/34789815/TUTORIAL\\_ACP\\_PRE\\_POST](https://www.academia.edu/34789815/TUTORIAL_ACP_PRE_POST)
8. Маслей В.Н., Бобырь И.И., Рудаков К.Н., Попель В.М., Кулик А.С. «Об определении модулей упругости слоя композиционного материала» // МНТК «Прогресивна техніка, технології та інженерна освіта». – 2019. – С. 365. – 368.
9. Dyfuchyn Y., Rudakov K. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – no. 79. – P. 19 – 25. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95756>
10. Цыбенко А.С., Рассамкин Б.М., Рыбалка А.А. Анализ прочности наноспутника POLYITAN-2 при действии случайных нагрузок на этапе выведения на орбиту // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №81. – С. 28 – 33. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.114113>
11. Карпов Я.С., Ставиченко В.Г. Методика расчета на прочность слоистых композиционных материалов при термомеханическом нагружении // Проблемы прочности. – 2010. – №4. – С. 154 – 164.

## Оценка предельного состояния углепластика AS4/3501-6 carbon/epoxy со схемой армирования $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$ в условиях плоского и линейного напряженного состояния

В. В. Рубашевский, С. М. Шукаев

**Проблематика.** Композиционные материалы, в частности, слоистые углепластики, армированные высокопрочными однонаправленными волокнами, широко применяются во многих отраслях промышленности. Активное развитие производства волокон и матриц приводит к большому количеству новых материалов и широкого их применения в производстве требует эффективных методик для оценки предельного состояния углепластика при различных условиях нагрузки.

**Цель исследования.** Сравнительный анализ методов оценки прочности на примере слоистого углепластика с волокном AS4 carbon и матрицей 3501-6-epoxy схеме армирования  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  в условиях линейного и плоского напряженного состояния с помощью аналитической модели деградации механических свойств слоя композита, предложенной в работе М. К. Кучера и М. М. Заразовского и методом численного моделирования в программной среде ANSYS Workbench.

**Методика реализации.** Механические характеристики монослоя углепластика были предварительно рассчитаны по разным аналитическим методам: правилом смеси, методом коаксиальных цилиндров, моделью Кильчинского и методом Ванина. Расчеты напряжений по двум методам сравнивались с результатами испытаний трубчатых образцов из слоистого углепластика с волокном AS4 carbon и матрицей 3501-6-epoxy в условиях линейного и плоского напряженного состояния, опубликованным в работе группы авторов (P. D. Soden, M. J. Hinton & A. S. Kaddour).

**Результаты исследования.** Проанализированы границы применения численного и аналитического методов для оценки прочности углепластиков при линейном и плоском напряженном состоянии.

**Выводы.** На основе исследований сделан вывод о том, что модель деградации механических свойств слоя требует усовершенствования в условиях отрицательного соотношения между главными напряжениями. Подтверждена эффективность применения модулей ACP (Pre) и ACP (Post) программной среды ANSYS Workbench для оценки предельного состояния слоистого углепластика в условиях линейного и плоского напряженного состояния.

**Ключевые слова:** оценка предельного состояния, плоское напряженное состояние, слоистый углепластик, композиционные материалы, константы упругости.

## Estimation of limit state for quasi-isotropic $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$ AS4/3501-6 carbon/epoxy under uniaxial and biaxial loads

V. Rubashevskiy, S. Shukayev

**Background.** Composite materials, in particular laminated carbon fiber reinforced with high-strength unidirectional fibers, are widely used in many industries. The active development of the production of fibers and matrices leads to a large number of new materials and their widespread using in production requires effective techniques for estimate the ultimate state of carbon fiber under various load conditions.

**Objective.** Comparative analysis of strength estimation methods using the example of laminated carbon fiber with AS4 carbon fiber and a 3501-6-epoxy matrix reinforcing pattern  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  under UNIAXIAL AND BIAXIAL LOADS conditions using an analytical model of the degradation of the mechanical properties of the composite layer proposed in the work of M.K. Kucher and M.M. Zarazovskii and the method of numerical simulation in the software environment ANSYS Workbench.

**Methods.** The mechanical characteristics of the carbon fiber monolayer were previously calculated using various analytical methods: the mixture rule, the coaxial cylinder method, the Kilchinsky model, and the Vanin method. The stress calculations were compared with tests results published by a group of authors (P.D. Soden, M.J. Hinton & A.S. Kaddour).

**Results.** The application boundaries for numerical and analytical methods for assessing the strength of carbon plastics in a plane and linear stress state are analyzed.

**Conclusions.** Based on the studies, it was concluded that the model of degradation of the mechanical properties of the layer requires improvement under conditions of a negative ratio between the main stresses. The effectiveness of using the ACP(Pre) and ACP(Post) modules of the ANSYS Workbench software environment for estimation the ultimate state of laminated carbon fiber reinforced plastic under uniaxial and biaxial loads conditions is confirmed.

**Keywords:** estimation of limit state, biaxial stress state, laminated carbon fiber reinforced plastic, composite materials, elastic constants.

## References

1. Kucher, M. and Zarazovskii, M. (2009), "Otsinka mitsnosti sharuvatych plastykiv iz vrachuvannjam degradatsii mechanichnyh harakterystyk v protsesi deformuvannja", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series of mechanical engineering. *Vestnik NTUU «KPI». Serija Mashynostroenie*, vol. 57, pp. 174 – 179.
2. Zarazovskii, M. (2009), Deformuvannja i mitsnist sharuvatych vugleplastykiv pry kimnatni i kriogennuh temperaturah: dissertation of PhD in Technical Sciences: 01.02.04, Kiev, Ukraine.
3. Soden, P.D., Hinton, M.J. and Kaddour, A.S. (1998), "Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fiber-reinforced composite laminates", *Composites Science and Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 1011 – 1022. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00078-5)
4. Rubashevskiy, V., Zarazovskii, M. and Shukyev, S. (2017), "Analysis of methods for determination of the constants of elasticity unidirectional layer composite materials", *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 80, no. 2, pp. 107 – 112. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109634>
5. Horoshun, L. (1993), *Staticheskaja machanika i effektivnye svoystva materialov* [Статистическая механика и эффективные свойства материалов], *Mechanica compositov*, in Guzja A.N. (ed.), Nauk. Dumka, Kiev, Ukraine.
6. Soden, P.D., Hinton, M.J. and Kaddour, A.S. (2002), "Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates: failure exercise benchmark data", *Composites Science and Technology*, vol. 62, no. 12, pp. 1489 – 1514. [https://www.academia.edu/34789815/TUTORIAL\\_ACP\\_PRE\\_POST](https://www.academia.edu/34789815/TUTORIAL_ACP_PRE_POST)
7. Masley, V., Bobyr, N., Rudakov, K., Popel', V. and Kulyk, A. (2019), "About Defining moduls of elasticity of composite material layer" *ISTC, The Progressive Technics, Technology and Engineering Education*, pp. 365 – 368.
8. Dyfuchyn, Y. and Rudakov, K. (2017), Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers, *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 79, no. 1, pp. 19 – 25. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95756>
9. Tsybenko, Aleksandr, Borys Rassamakin, Rybalka, Anton (2017), "Strength of nanosatellite POLITAN-2 in action of random loads at stage of transfer to orbit", *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 81, no. 3, pp. 28 – 33. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.114113>
10. Karpov, Ja. and Stavychenko, V. (2010), "Metodika rascheta na prochnost' sloistykh kompozitsionnykh materialov pry termomechanichnykh nagruzeniyi", *Strength of Materials*, no. 4, pp. 154 – 164.